

## ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АЗОТЕ И ГЕЛИИ ПРИ НИЗКОМ НАПРЯЖЕНИИ НА ГАЗОВОМ ДИОДЕ

Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко, Е.А. Хрущ

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

*Экспериментально зафиксировано, что во время зажигания разряда в атмосфере азота и гелия при низком напряжении на газовом диоде (~25 кВ) происходит генерация пучка убегающих электронов, причем режимы генерации могут быть различными, и зависят от давления газа. Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на промежутке составляло менее 1 нс. На основе влияния поперечного магнитного поля 0,016 Тл на поведение электронного пучка предполагается, что наносекундный электронный пучок при низких давлениях генерируется у катода. Показано влияние подсветки на генерацию электронного пучка.*

В работах [1–6] (см. также обзоры [7–9] и ссылки в них) сообщалось о получении электронных пучков за фольгой газовых диодов, заполненных газами повышенного давления. В этих работах на промежуток подавались импульсы напряжения с амплитудой более 100 кВ. Электронный пучок был получен как на переднем, так и на заднем фронте импульса напряжения во время увеличения проводимости промежутка [7–9]. Как показали последние измерения, длительность тока пучка убегающих электронов на полувысоте при давлении различных газов 1000 гПа составляет ~0,1 нс [4–6, 9]. Известно также об исследованиях рентгеновского излучения из газовых диодов [10, 11] и пучков электронов за сетчатым анодом [12, 13] при малых амплитудах импульсов напряжения ≤20 кВ. Однако в [10–13] использовались осциллографы со сравнительно низким временным разрешением. Кроме того, при низких напряжениях на газовом диоде область генерации электронного пучка и коллектор разделялись сеткой, а, как известно, для вывода пучка убегающих электронов лучше использовать тонкую фольгу. Последнее обстоятельство влияло на точность измерений параметров электронного пучка.

Цель данной работы – исследовать параметры пучка убегающих электронов в азоте и гелии при малом напряжении на промежутке (~25 кВ) и определить в этих условиях время запаздывания генерации пучка и его длительность. При проведении исследований параметры пучка электронов измерялись за металлизированной пленкой, а временное разрешение коллектора и осциллографа было не хуже 0,1 нс.

Экспериментальная установка состояла из разрядной камеры и импульсного кабельного генератора [14]. Внутренний диаметр камеры равнялся ~50 мм. Использовались две конфигурации электродов. Конфигурация электродов № 1 была образована плоским анодом и выпуклым катодом из нержавеющей стали с магнелиевым напылением. Диаметр катода равнялся 20 мм, радиус кривизны 12 мм. Конфигурация электродов № 2 была образована плоским анодом и катодом с малым радиусом кривизны, что приводило к усилению электрического поля у катода. Катод с малым радиусом кривизны был выполнен в виде трубки диаметром ~5 мм из титановой фольги толщиной 50 мкм. Для измерения тока разряда плоский анод был

соединен с корпусом камеры через шунт, состоящий из соединенных параллельно 60 пленочных чип-резисторов с величиной сопротивления 3,3 Ом каждый. При регистрации пучка убегающих электронов анод был выполнен из двух металлических сеток с прозрачностью 64 %, между которыми помещалась металлизированная (слой алюминия толщиной 0,2 мкм) пленка из кимфоли ( $C_{16}H_{14}O_3$ ) толщиной 2 мкм, или фольга из алюминия толщиной 3 мкм. Расстояние между катодом и анодом обычно составляло 6 мм (конфигурация электродов № 1), или 12 мм (конфигурация электродов № 2). За анодом из сеток с фольгой на расстоянии 9 мм устанавливался коллектор с временным разрешением не хуже 0,1 нс.

В ряде экспериментов в разрядном промежутке присутствовало поперечное магнитное поле (со средней индукцией по оси камеры  $\langle B \rangle = 0,016$  Тл), которое создавалось двумя самарий-кобальтовыми магнитами. С помощью фотопленки, расположенной непосредственно за сетчатым анодом, за 200 импульсов регистрировался автограф электронного пучка. Фотопленка была помещена в светонепроницаемый конверт.

В ходе работы проводились оценочные расчеты отклонения пучка электронов при движении в поперечном магнитном поле. Для этого использовалось уравнение движения электрона в скрещенных электрических и магнитных полях при наличии столкновений:

$$m_e \frac{dv_e}{dt} = eE + ev_e \times B - m_e v_e \cdot v_p,$$

где  $m_e$  – масса электрона,  $e$  – его заряд,  $v_e$  – скорость электрона,  $E$  – вектор напряженности электрического поля,  $B$  – вектор магнитной индукции,  $v_p = \sigma_{ea} \cdot n_a \cdot v_e$  – эффективная частота потери импульса,  $\sigma_{ea}$  – сечение электрон-атомных взаимодействий,  $n_a$  – концентрация атомов в газе.

Проводились также эксперименты с подсветкой разрядного промежутка излучением барьерного разряда. При подаче импульса высокого напряжения на катод барьерный разряд зажигался между катодом и поверхностью двух кварцевых трубок с внешним диаметром 5 мм, внутри которых помещалась медная фольга. Кварцевые трубки размещались параллельно с двух сторон катода, а медная

фольга соединялись с корпусом газового диода. Спектральный состав излучения барьерного разряда специально не исследовался.

Эксперименты были проведены при заполнении камеры гелием либо азотом при давлении  $133...10^5$  Па. Генератор формировал на катоде импульсы напряжения амплитудой 25 кВ, длительностью  $\sim 90$  нс и временем нарастания  $\sim 5$  нс. Отраженные от разрядного промежутка импульсы тока и напряжения поглощались в генераторе. Для регистрации сигналов с емкостного делителя и коллектора применялся осциллограф TDS-6604 с полосой пропускания 6 ГГц и осциллограф TDS-3054B с полосой пропускания 500 МГц.

В ходе экспериментов регистрировались напряжение на электродах и ток разряда, а также напряжение на электродах и ток электронного пучка в гелии и азоте при разном давлении газов.

При подаче на межэлектродный промежуток импульса напряжения амплитудой 25 кВ и длительностью 90 нс промежуток пробивался и, в зависимости от давления газа, формировался объемный либо контрагированный разряд. Характерные осциллограммы тока и напряжения разряда представлены на рис. 1. Время запаздывания пробоя в отсутствие внешней предыонизации изменялось случайным образом и могло составлять десять и более наносекунд (при повышенных давлениях). Предыонизация промежутка стабилизировала время запаздывания пробоя. Так, при давлении гелия  $10^3$  Па это запаздывание составило  $\sim 4...5$  нс.

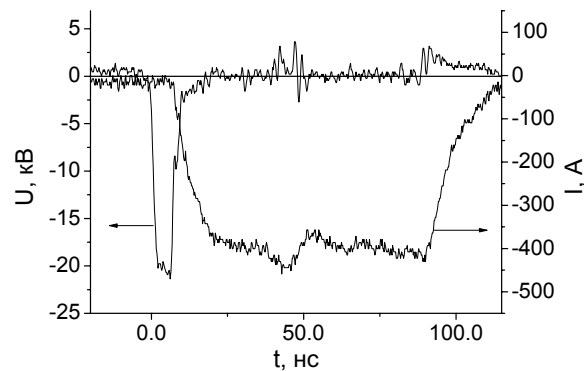


Рис. 1. Ток разряда в гелии и напряжение на электродах для конфигурации электродов № 1 в отсутствие подсветки. Давление гелия  $4 \cdot 10^4$  Па

При регистрации пучка убегающих электронов в гелии было замечено, что с уменьшением давления меняется режим генерации убегающих электронов. Для конфигурации электродов № 1 при высоких давлениях гелия ( $\sim 8 \cdot 10^4$  Па) реализуется режим генерации СЛЭП (сверхкороткого лавинного электронного пучка [3, 4]) длительностью на полувысоте  $\sim 200$  пс ( $\sim 400$  пс по основанию). Разумеется, здесь и ниже даны приблизительные значения границ интервалов с различными режимами генерации убегающих электронов. Отметим, что длительность СЛЭП на полувысоте в данных условиях (напряжение на промежутке  $\sim 25$  кВ) оказалась в два раза

больше, чем при подаче на этот же газовый диод импульса напряжения в сотни киловольт [4]. В области давлений гелия  $\leq 8 \cdot 10^4$  Па реализуется один из следующих вариантов: однопичковый режим генерации убегающих электронов (длительность импульса  $\sim 1,5...3$  нс), двухпичковый режим (длительность первого пика  $\sim 1...1,5$  нс, второго пика  $\sim 1,5...3$  нс, причем второй пик по амплитуде больше первого), СЛЭП, либо смешанный режим, когда вначале генерируется СЛЭП, а затем — электронный пучок большей длительности. На рис. 2 приведена характерная осциллограмма пучка убегающих электронов, соответствующая смешанному режиму генерации. При давлении гелия  $8 \cdot 10^3$  Па разряд загорался уже не в межэлектродном промежутке, а между основанием катодного штока, на котором крепился катодный электрод, и стенками камеры. Амплитуда тока электронного пучка при изменении давления гелия колебалась в широких пределах, достигая при давлении  $2,4 \cdot 10^4$  Па максимального значения  $\sim 0,1...0,2$  А. Для конфигурации электродов № 2 также наблюдались смешанный и другие варианты режимов генерации при давлении  $\leq 2 \cdot 10^4$  Па (величина межэлектродного зазора 12 мм). Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на промежутке составляло менее 1 нс.

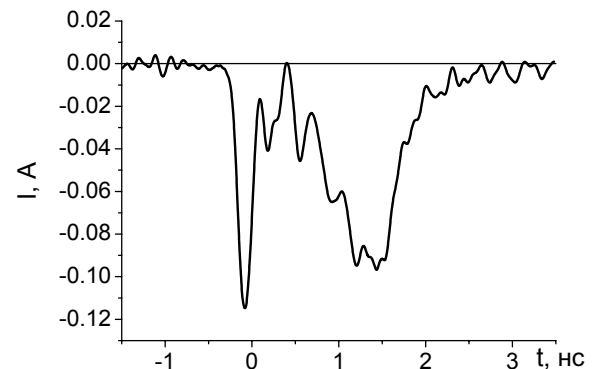


Рис. 2. Ток пучка убегающих электронов. Разряд в гелии при давлении  $2,4 \cdot 10^4$  Па. Конфигурация электродов № 1

Для азота при регистрации пучка убегающих электронов наблюдалась подобная картина: в области давлений  $8 \cdot 10^3...1,6 \cdot 10^4$  Па регистрировался СЛЭП, при давлении  $\leq 4 \cdot 10^3$  Па — наблюдались различные режимы генерации электронного пучка; при давлении  $\leq 8 \cdot 10^2$  Па разряд загорался уже не в межэлектродном промежутке, а между основанием катодного штока, на котором крепился катодный электрод, и стенками камеры. Амплитуда тока электронного пучка при изменении давления азота также колебалась в широких пределах. Максимальные значения тока пучка  $\sim 0,2...0,3$  А регистрировались при давлении азота  $4 \cdot 10^3...8 \cdot 10^3$  Па. Для конфигурации электродов № 2 (величина межэлектродного зазора 12 мм) в области давлений  $\sim 1,33 \cdot 10^3...2,66 \cdot 10^4$  Па наблюдался СЛЭП, а при давлении  $\leq 8 \cdot 10^2$  Па наблюдались различные режимы генерации электронного пучка. Запаздывание момента начала генерации электронного пучка отно-

сительно начала спада напряжения на промежутке, как и для разряда в гелии, составляло менее 1 нс.

В экспериментах с поперечным магнитным полем ( $\langle B \rangle = 0,016$  Тл) регистрировались автографы электронного пучка в присутствии магнитного поля и без него. Фотографии автографов пучка при давлении гелия  $6 \cdot 10^3$  Па изображены на рис. 3. Перекрестия на фотографиях автографов – тень от проволочек, закрепленных на сетчатом аноде. Видно, что магнитное поле вызывает смещение электронного пучка.

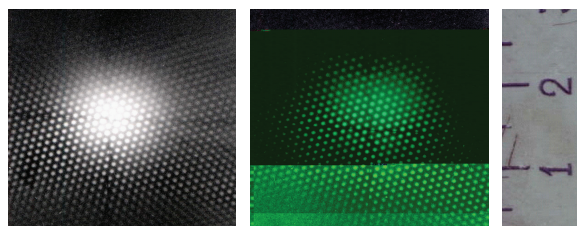


Рис. 3. Автографы электронного пучка в отсутствии магнитного поля и с магнитным полем в разрядном промежутке. Справа – фотография линейки. Гелий,  $6 \cdot 10^3$  Па

Эксперименты показали, что при давлении гелия  $\leq 6 \cdot 10^3$  Па электронный пучок локализован в небольшой области диаметром менее сантиметра. Увеличение давления гелия увеличивает также рассеяние пучка в газе, что приводит к возрастанию площади электронного пучка и его автографа и отсутствию четких границ. Потому зафиксировать отклонение пучка в магнитном поле уже труднее. При давлении гелия  $6 \cdot 10^3$  Па отклонение пучка в магнитном поле составило 2,8 мм, что практически совпадает с оценками смещения, рассчитанными с помощью приведенного выше ура-

внения движения электрона в скрещенных полях при условии, что напряжение на промежутке 25 кВ и электроны начинают ускоряться в области катода. Это соответствие позволяет предполагать, что наносекундный электронный пучок формируется у катода.

Отметим, что основной причиной почернения фотопленки являлся электронный пучок. Для проверки этого между конвертом с фотопленкой и анодом помещалась Al-фольга толщиной 10 мкм. Через такую фольгу электронный пучок не проходит, а рентгеновское излучение ослабляется незначительно. Эксперимент показал, что в присутствии Al-фольги 200 импульсов для получения автографа недостаточно, следовательно, почернение фотопленки вызывается электронным пучком.

Эксперименты с подсветкой межэлектродного промежутка (конфигурация электродов № 1) излучением барьерного разряда показали, что она влияет на генерацию пучка убегающих электронов. Так, при давлении гелия  $8 \cdot 10^4$  Па и подсветке межэлектродного промежутка электронный пучок за анодом отсутствовал. В условиях подсветки промежутка электронный пучок за анодом отсутствовал также в азоте при давлении  $1,6 \cdot 10^4$  Па. Такое влияние подсветки на генерацию СЛЭП можно объяснить отсутствием необходимой для этого волны ионизации, так как весь промежуток в присутствии подсветки ионизуется одновременно [8]. При использовании подсветки концентрация электронов в промежутке увеличивается более равномерно и критическое поле, необходимое для режима убегания, у анода при повышенных давлениях гелия и азота не достигается.

Работа доложена на VIII Международной конференции «Atomic and Molecular Pulsed lasers», Tomsk, 10–14 September, 2007.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. Быстрые электроны и рентгеновское излучение наносекундных импульсных разрядов в газах при давлениях 0,1–760 Тор // Журнал технической физики. – 1974. – Т. 44. – № 3. – С. 564–568.
2. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. О генерации электронов аномальной энергии при наносекундных разрядах в плотных газах // Журнал технической физики. – 1978. – Т. 48. – № 8. – С. 1617–1620.
3. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. Формирование пучка электронов и объемного разряда в воздухе при атмосферном давлении // Известия вузов. Физика. – 2003. – № 3. – С. 94–95.
4. Tarasenko V.F., Shunailov S.A., Shpak V.G., Kostyrya I.D. Supershort electron beam from air filled diode at atmospheric pressure // Laser and Particle Beams. – 2005. – V. 23. – № 4. – P. 545–551.
5. Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. О динамике формирования субнаносекундного электронного пучка в газовом и вакуумном диоде // Письма в журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – № 1. – С. 35–44.
6. Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. О формировании субнаносекундных импульсов тока пучка большой плотности в газовом диоде при низких давлениях // Письма в журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – № 21. – С. 69–75.
7. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // Успехи физических наук. – 1990. – Т. 160. – № 7. – С. 49–82.
8. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Механизм убегания электронов в плотных газах и формирование мощных субнаносекундных электронных пучков // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – № 9. – С. 953–971.
9. Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д. О формировании объемных наносекундных разрядов, субнаносекундных пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения в газах повышенного давления // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 12. – С. 40–50.
10. Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck, Wales W. Observation of X-rays from spark discharges in a spark chamber // Nuclear Instruments and Methods. – 1966. – V. 44. – P. 345–348.
11. Кремнев В.В., Курбатов Ю.А. Исследование рентгеновского излучения из газового разряда в высоких электрических полях // Журнал технической физики. – 1972. – Т. 42. – № 4. – С. 795–799.
12. Бохан П.А., Колбычев Г.В. Генерация сильноточных импульсных электронных пучков в газе среднего давления // Журнал технической физики. – 1981. – Т. 51. – № 9. – С. 1823–1831.
13. Сорокин А.П. Влияние компенсационных токов на открытый разряд // Письма в журнал технической физики. – 2003. – Т. 29. – № 10. – С. 15–22.
14. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

Поступила 31.10.2007 г.